



Estudi experimental del control de les fractures ortogonals a l'anisotropia en el desenvolupament de bandes de cisalla

Norbert Caldera Grau, Jordi Carreras Planells*, Elena Druguet Tantiñà*

** Tutors del treball (Departament de Geologia, Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra, Barcelona, Spain. MIET Grup de Recerca)*

Projecte: Treball de Final de Grau. Grau de Geologia 2013/2014

RESUM

L'objectiu del treball és analitzar com influeix la fracturació prèvia, en concret un diaclasat ortogonal a la foliació dominant, i l'orientació de la foliació, en el desenvolupament d'estructures en processos deformatius dúctils durant la nucleació i evolució de les zones de cisalla. S'ha observat que la mateixa cinemàtica pot generar estructures totalment diferents. La deformació es particiona en funció de les relacions angulars i estructurals preexistents entre la foliació, fractures i els eixos cinemàtics.

RESUMEN

El objetivo del trabajo es analizar cómo influye la fracturación preexistente, concretamente un diaclasado ortogonal a la foliación dominante, y la orientación de la foliación, en el desarrollo de estructuras en procesos deformativos dúctiles durante la nucleación y evolución de las zonas de cizalla. Se ha observado que la misma cinemática puede generar estructuras totalmente diferentes. La deformación se particiona en función de las relaciones angulares i estructurales preexistentes entre la foliación, fracturas y los ejes cinemáticos.

ABSTRACT

The aim of this study is to analyze how pre-existing fractures, particularly joint sets orthogonal to a dominant foliation, and the orientation of foliation, influence in the development of structures, in ductile deformational processes during nucleation and evolution of shear zones. The same kinematic conditions could generate totally different structures. The deformation is partitioned depending on the previous angular and structural relationship between foliation, fractures and the kinematic axes.

1. Introducció

Aquest treball està inspirat en un fenomen observable al Cap de Creus: la presència de zones de cisalla dúctils associades a un diaclasat previ perpendicular a la foliació dominant. Es planteja si aquest diaclasat és el responsable d'acumular els esforços mitjançant lliscament. El Cap de Creus està situat al NE de la península Ibèrica i S de França. Conformava l'acabament oriental de la Zona Axial del Pirineu, el nucli de la serralada, el contacte entre les plaques Europea i Ibèrica (més petita però més dinàmica). Està constituït per materials d'edat paleozoica, esquists metapelítics i metagrauvàquics, que van ser afectats per l'Orogènia Herciniana. Durant l'orogènia, hi va haver diferents processos ignis, metamòrfics i tectònics, els quals van generar uns dels millors exemples mundials de zones de cisalla per deformació dúctil (Carreras 2001).

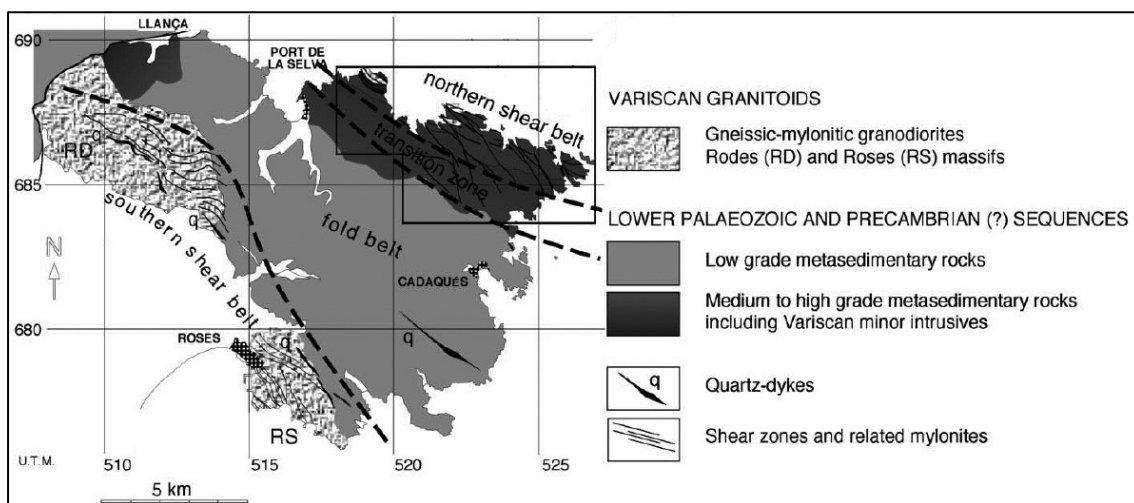


Fig. 1. Mapa geològic de la zona del Cap de Creus. (Carreras, 2001)

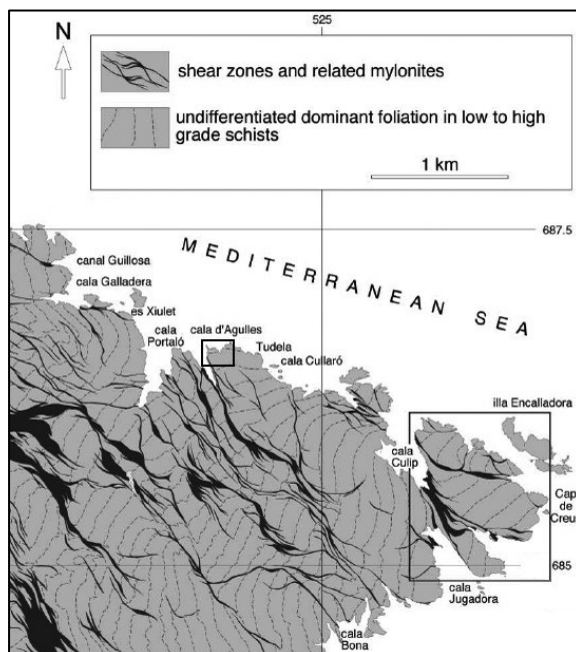


Fig. 1. Mapa de la zona de cisalla del Cap de Creus. (Carreras, 2001)

Els materials que conformen el Cap de Creus són anisòtrops, com s'ha dit anteriorment, esquistos metapelítics intercalats amb esquistos metagrauvàquics i en algunes zones hi ha la presència, important, d'intrusions pegmatítics. L'anisotropia consisteix en una foliació o esquistositat d'orientació variable deguda al plegament. Les pegmatites es comporten com a blocs rígids, si el cos és de grans dimensions, o bé experimenta una deformació important en zones de cisalla com els esquistos, si són cossos de dimensions més reduïdes.

El fenomen objecte d'estudi d'aquest treball, és l'existència d'un diaclasat ortogonal a la foliació dominant dels esquistos (Fig. 3.), probablement previ a les darreres fases deformatives a la zona, fet que influeix en el desenvolupament d'estructures durant els processos deformatius en condicions dúctils. L'orientació de la foliació general va canviant en l'espai al Cap de Creus, i s'observen tres direccions marcades, nord-sud, nord-est-sudoest i est-oest. El diaclasat però, és perpendicular a la foliació de forma homogènia en l'espai.

Estudis realitzats per diversos autors demostren que el grau d'anisotropia de les roques i l'orientació de la mateixa respecte els esforços i eixos de deformació principals són factors que determinen la geometria i la localització de les discontinuïtats (Carreras et al., 2013). Aquest fenomen també s'observa al Cap de Creus amb la variació de l'orientació de la foliació i és el que també es tindrà en compte en els experiments.

La hipòtesi que es planteja és que el diaclasat ortogonal a la foliació dominant pot localitzar o distribuir la deformació depenent de la seva orientació respecte els eixos de deformació o cinemàtics. Per tant, s'espera obtenir models, amb materials analògics (plastilina) que generin anisotropia litològica (*layer-parallel*) i estructural (fractures). S'espera la nucleació i formació de noves fractures, o bé models en què la deformació s'acomodi per rotació de les capes i cisalla en les fractures, o bé combinacions d'ambdues propostes.

L'objectiu és demostrar la hipòtesi plantejada, o bé, obtenir nous resultats que ajudin a definir la problemàtica plantejada. Per a resoldre-la s'han realitzat dos experiments de deformació amb materials analògics que s'explicaran a continuació.



Fig. 3. Esquema que representa la relació entre esquistositat (verd) i fractures perpendiculars a la mateixa (vermell). (Font pròpia)

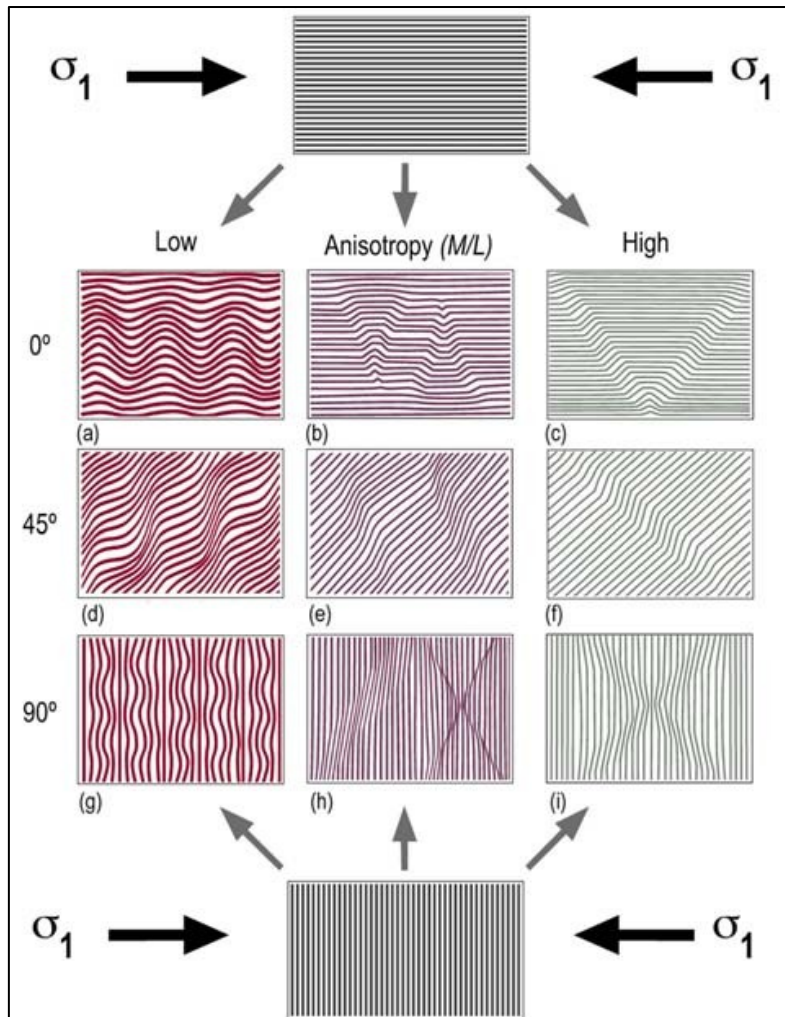


Fig. 4. Esquema dels resultats del procés deformatiu en condicions dúctils. Mostra l'efecte de la relació entre anisotropia mecànica i la seva orientació respecte de l'esforç principal σ_1 . (Carreras, J. et al., 2013)

2. Materials i Metodologia

- Plastilina ocluplast (groga i blava)
- Vaselina (Brugarolas)
- Màquina BCN-Stage
- Rodet i tòrcul
- Microones
- Serra
- Glicerina
- Llapis
- Ordinador
- Càmera fotogràfica amb disparador automàtic
- Paper d'alumini
- Balança
- Ganivets, espàtula i cullera
- Suport de fusta amb relació angular
- Transportador d'angles
- Regle
- Retoladors o marcadors
- Paper i paper vegetal
- Scanner
- Pesos per compactar

2.1. Introducció als experiments de deformació

Els experiments consistiran en la generació de tres blocs de plastilina rectangulars, amb dimensions de 30x15x10 cm, formats per dos tipus de capes intercalades entre si i amb propietats intrínseques diferents. Les capes més competents estaran fetes de plastilina groga i les capes menys competents de plastilina blava rebaixada amb vaselina, un 10% del pes de la plastilina. Cada bloc tindrà una relació angular diferent entre l'anisotropia i la direcció d'escurçament per representar la foliació variable del Cap de Creus, una relació serà de 30°, l'altra de 60° i finalment de 45° (si és possible). Les capes tindran 3 fractures perpendiculars a la foliació amb un espaiat de dimensions equivalents entre elles. Un cop generats els blocs es deformaran amb l'aparell BCN-Stage mitjançant cisalla simple i condicions dúctils, amb una aportació de calor constant. El resultat final presentarà l'efecte combinat d'ambdues estructures, foliació i diaclasat perpendicular, en un episodi deformatiu de condicions dúctils.

2.2. Elaboració dels blocs amb materials anàlegs

Primer de tot vam realitzar un model esquemàtic a l'ordinador per tenir una referència de la longitud de les capes segons la relació angular de l'experiment. Un cop realitzat el model, vam col·locar el suport amb la relació angular corresponent i seguidament vam començar a elaborar el model amb les capes de plastilina.

- **Plastilina groga:** El primer pas és pesar la quantitat necessària de plastilina per a fer la làmina, 350g (pel de 30°) i 613g (pel de 60°) per cada làmina. Un cop pesada s'introdueix al microones uns segons perquè s'estovi i esdevingui mal·leable. Amb l'ajuda d'un rodet o les mans es modela la plastilina en forma rectangular i es passa pel tòrcul entremig de dos fulls de paper vegetal, perquè no s'enganxi amb la base ni amb el tòrcul, fins assolir el gruix de 8 mil·límetres. Amb un regle fem les mesures corresponents i amb el ganivet les guies per tallar la làmina. Es talla la làmina amb el ganivet i amb l'espàtula es posa sobre el suport amb la relació angular corresponent. A sobre hi anirà la següent capa de plastilina del color oposat fins completar l'alçada necessària.
- **Plastilina blava:** El primer pas és pesar la quantitat necessària de plastilina per a fer la làmina, 325g (pel de 30°) i 600g (pel de 60°) per cada làmina. Un cop pesada s'introdueix al microones uns segons perquè s'estovi i esdevingui mal·leable i seguidament es barreja amb un 10%, de vaselina, del total del pes de plastilina per disminuir la viscositat. Amb l'ajuda d'un rodet o les mans es modela la plastilina en forma rectangular i es passa pel tòrcul entremig de dos fulls de paper vegetal, perquè no s'enganxi amb la base ni amb el tòrcul, fins assolir el gruix de 8 mil·límetres. Amb un regle fem les mesures corresponents i amb el ganivet les guies per tallar la làmina. Es talla la làmina amb el ganivet i amb l'espàtula es posa sobre el suport amb la relació angular corresponent. A sobre hi anirà la següent capa de plastilina del color oposat fins completar l'alçada necessària.

Una vegada hem assolit l'alçada necessària que ens precisa la màquina hem de deixar que es compacti el model. Això ho aconseguim posant un tauló de fusta a sobre de l'última làmina amb un pes repartit de manera uniforme i ho deixem reposar entre dos o tres dies. Un cop

compactat s'ha de serrar i reconstruir el model perquè tingui forma rectangular. El procediment és el següent.

1. Marquem el triangle, que canviarem de la base del bloc a la part superior, amb un escaire i un ganivet. Des de la base del suport amb un angle de 30, 60 o 45 (si hi ha temps) graus, marquem el triangle i un cop definit el serrem i el guardem a part.
2. Realitzem la marca de les tres fractures. Han de ser perpendiculars a la foliació, tenir un espaiat de dimensions equivalents i han de poder travessar tot el model. Cal mencionar que en els experiments realitzats totes les fractures no van poder travessar tot el model degut a la complexitat de serrar el triangle en parts més petites.
3. Un cop definides les fractures serrem el bloc i anem numerant i ordenant les parts serrades que col·locarem a la taula per muntar el bloc.
4. Seguidament muntem el bloc definitiu per polir les vores i aconseguir les dimensions exactes amb la serra.

2.3. Deformació experimental dels blocs de materials anàlegs

Una vegada hem definit el bloc rectangular el posem dins la màquina amb la relació angular respecte la direcció d'escurçament, i el deixem confinat aproximadament un dia. És important que totes les vores estiguin recobertes amb glicerina, per evitar desperfectes tan en el bloc com en el vidre que utilitzarem de tapa. Passades les hores necessàries hi dibuixem una malla quadriculada per poder fer mesures de la deformació, hi posem la glicerina de la tapa i finalment ho tapem i iniciem l'experiment.

Els experiments es realitzen a temperatura constant de 28°C i en condicions de cisalla pura amb una velocitat de deformació (*strain rate*: $2e-5s^{-1}$) també constant, escurçant en la direcció de l'eix Z i obrint en la direcció d'X fins a invertir les dimensions del rectangle, que és quan s'assoleix l'escurçament màxim de la màquina. Es prenen fotografies de manera automàtica cada deu minuts per poder fer una animació i observar la deformació d'una manera clara i senzilla a posteriori. El temps total és de set hores i trenta minuts, i s'ha de controlar que l'experiment es desenvolupi amb normalitat. S'ha de vigilar que la temperatura, d'uns 28°C, no variï, que l'experiment no s'aturi i que no es produeixin desperfectes de qualsevol tipus.

2.4. Tractament de dades i resultats de la deformació experimental

Finalment, la màquina, genera un document Excel que permetrà fer l'anàlisi de les dades referides als desplaçaments de la cel·la en funció del temps i el moment deformatiu que es vulgui representar.

El pas final és retirar el bloc deformat de la màquina i fer-ne làmines d'un centímetre, aproximadament, per observar si hi ha variacions de les estructures en l'espai. Es poleixen i netegen les cares, per escanejar-les posteriorment. Un cop escanejades es reconstrueix el bloc i es conserva per a possibles dubtes o nous estudis.

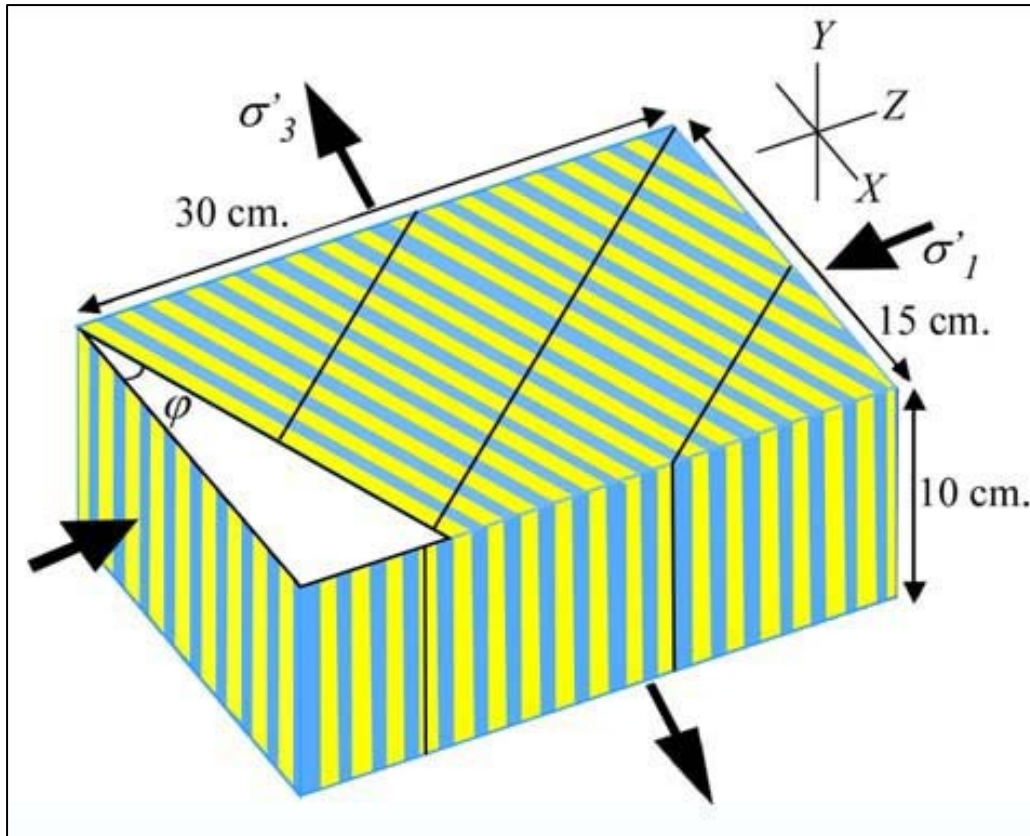


Fig. 5. Esquema del model de plastilina amb les dimensions reals, les fractures perpendiculars a les capes i les relacions angulars entre les capes i l'esforç principal (σ_1). Model experimental amb la relació angular que correspongui ϕ (Modificat de Gomez-Rivas & Griera, 2009).

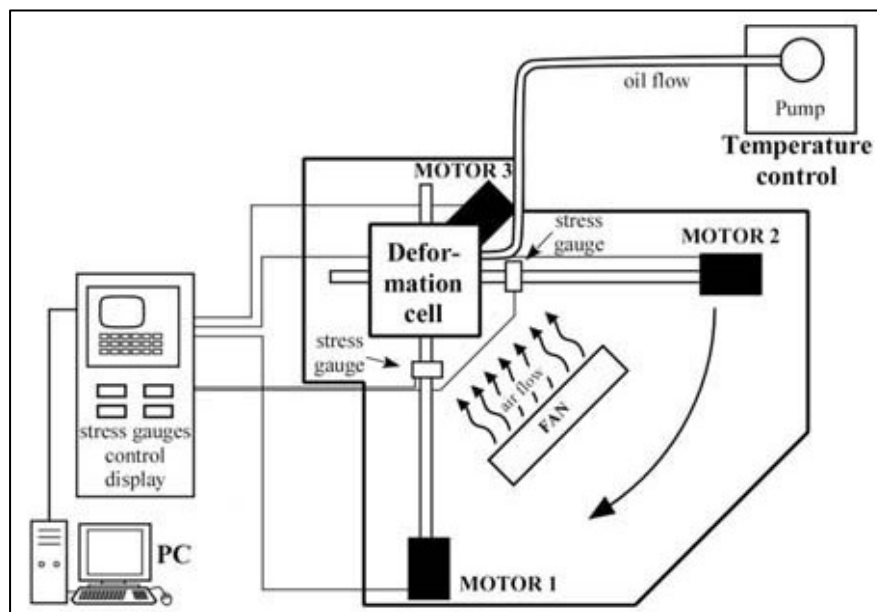


Fig. 6. Esquema del funcionament i els components de la màquina de deformació experimental. (Gomez-Rivas & Griera, 2012)

3. Resultats

3.1. Experiment de 30°. Conceptes de deformació

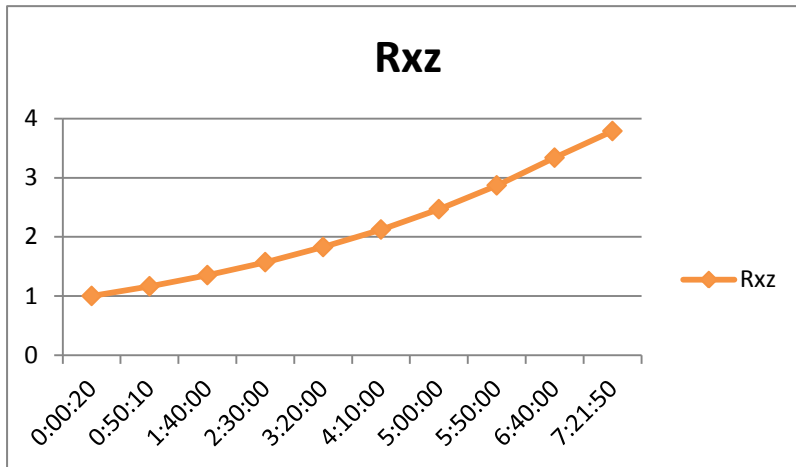


Fig. 7. Relació entre *stretch* en la direcció de l'eix X (estirament) i la direcció de l'eix Z (escurçament). En cada R_{xz} estudiat.

La relació de canvi de longitud entre els dos eixos d'esforços principals permet tenir una idea de l'evolució de la deformació al llarg de l'experiment. S'hi representa l'estirament relatiu en l'eix X respecte l'escurçament relatiu en l'eix Z. Aquest gràfic serveix de guia per entendre les dades dels resultats obtinguts en base a la deformació del bloc.

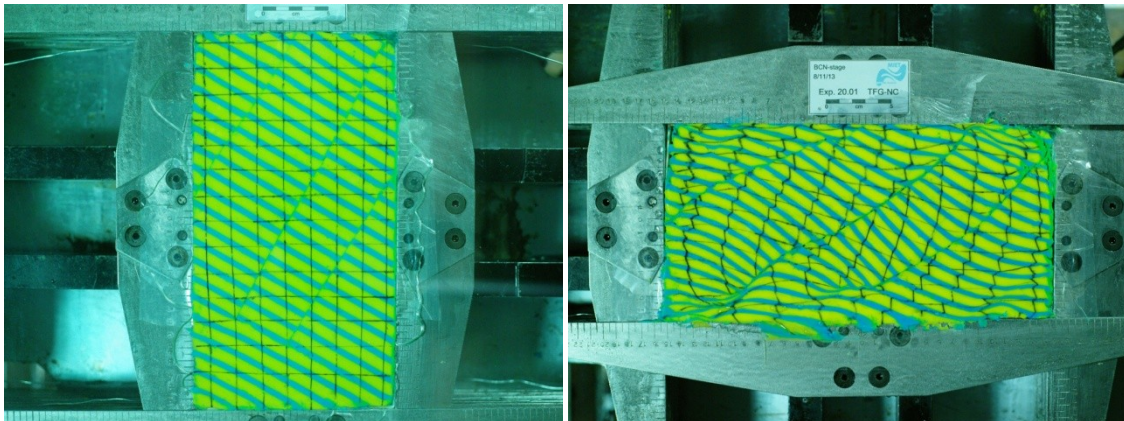


Fig. 8. Fotografia de l'inici (esquerra) i final (dreta) de la deformació de l'experiment de 30°.

3.1.1. Relació angular de capes i fractures respecte esforç principal (eix Z)

Els resultats obtinguts de les fractures són força homogenis i els que s'esperava obtenir, rotació de les fractures en sentit horari amb una disminució de la relació angular entre les mateixes i l'eix Z.

Els resultats obtinguts de les capes són força heterogenis. Hi ha tres dominis representatius:

1. **Zona esquerra:** el comportament general de les capes en aquesta zona és l'esperat, rotació de les capes en sentit antihorari amb una disminució de la relació angular entre les mateixes i l'eix Z.

2. **Zona centre:** el comportament general de les capes en aquesta zona és l'esperat fins al tercer estadi de deformació estudiat. A partir d'aquest estadi s'inverteix el sentit de rotació i passa de ser d'antihorari a horari fins a la finalització de l'experiment. La relació angular entre les capes i l'eix Z també augmenta quan es produeix la inversió en el sentit de rotació i arriba a superar la relació angular inicial de 30°.
3. **Zona dreta:** el comportament general de les capes en aquesta zona és l'esperat fins al quart estadi de deformació que s'inverteix el sentit de rotació i augmenta la relació angular, com passa en la zona centre. A partir del sisè estadi de deformació, però, es torna a invertir el sentit de rotació i torna a ser antihorari amb disminució de la relació angular.

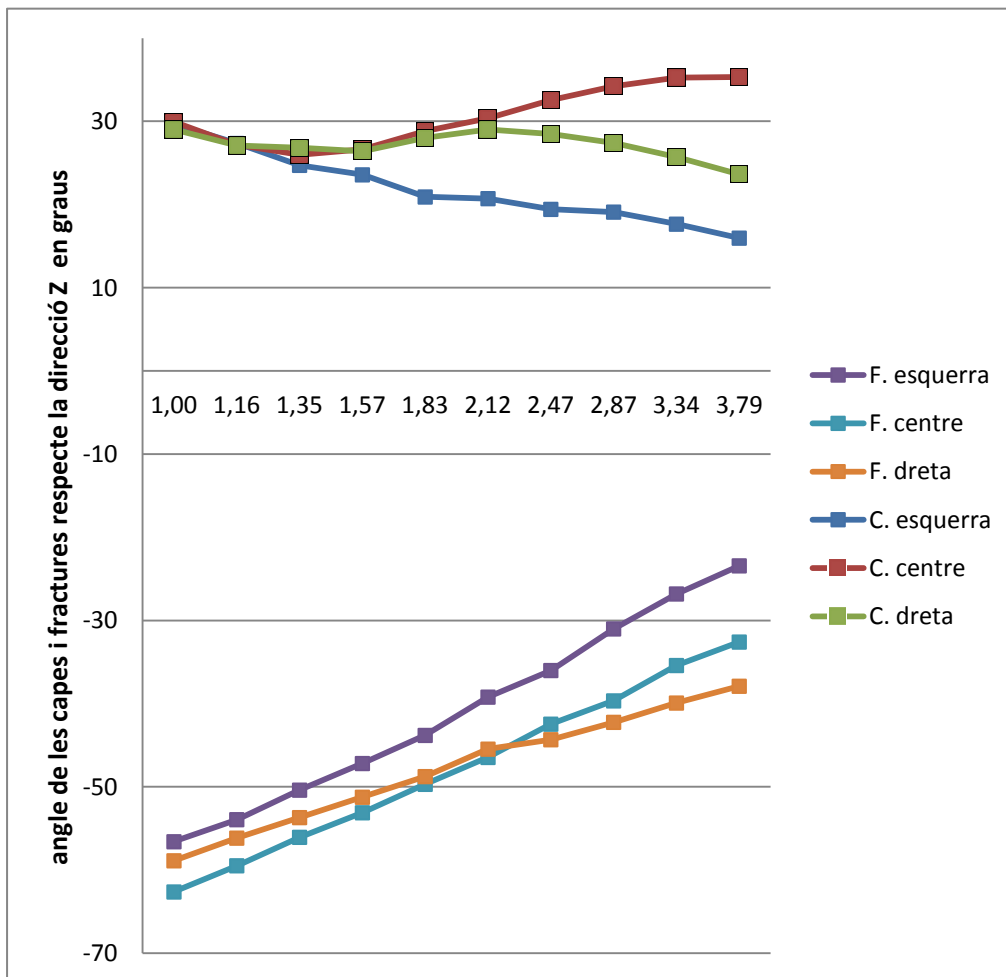


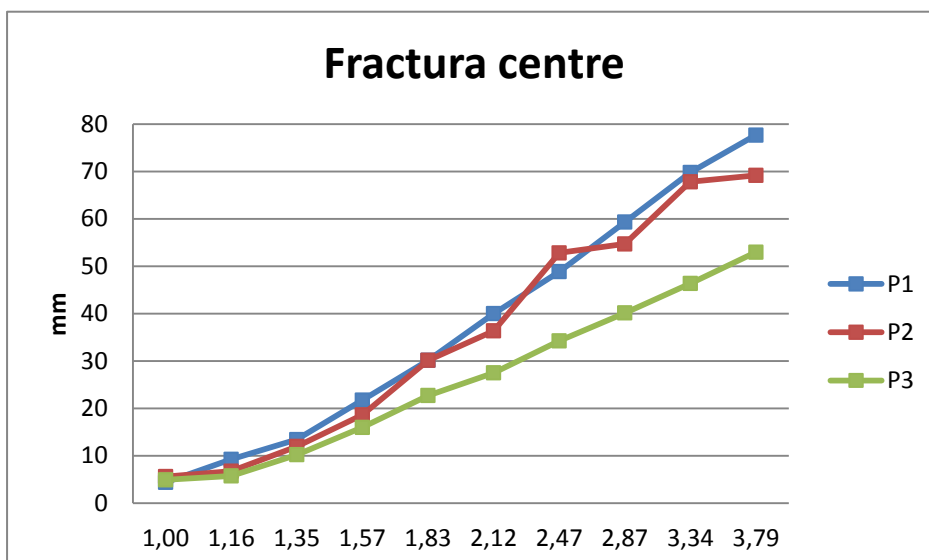
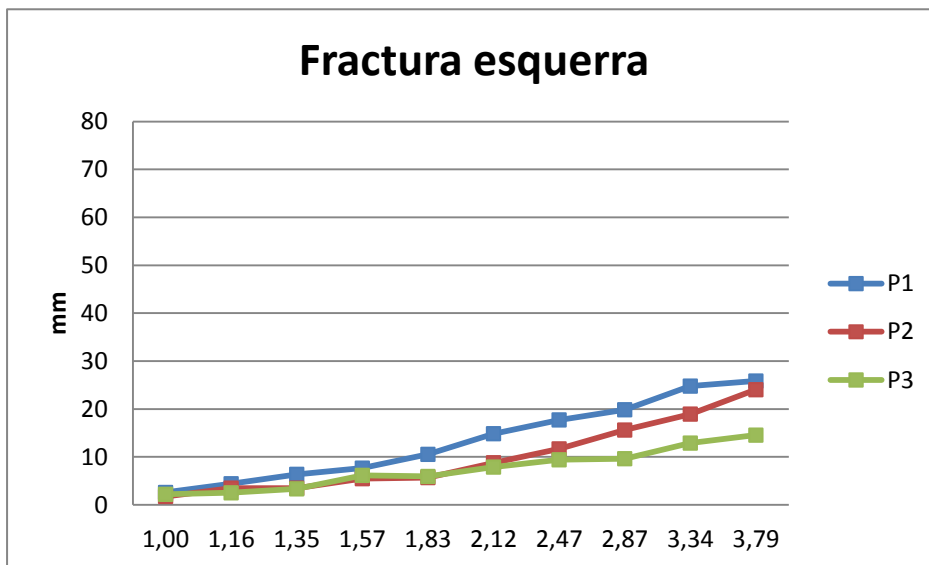
Fig. 9. Relació angular de les capes (C) i les fractures (F) respecte de la direcció de màxim escurçament (eix Z) en cada Rxz estudiat. Angles de les fractures considerats negatius. Notar la rotació antihorària en l'evolució de les capes del domini centre.

3.1.2. Cisalla de les fractures

El desplaçament que han generat les fractures és molt heterogeni i cadascuna ha funcionat de manera independent.

La fractura esquerra del bloc, la més curta i la que travessa el bloc sencer, és la que ha tingut un desplaçament menor amb un màxim de 2,5 centímetres. La fractura centre és la més llarga i està delimitada pel triangle que no es va serrar a la base. És la fractura que ha desplaçat més amb un màxim de 7,7 centímetres. Finalment la fractura dreta del bloc és la de dimensions intermitges i també està delimitada pel triangle a la base. El desplaçament d'aquesta fractura ha estat intermedi amb un màxim de 5,6 centímetres.

El fet que les fractures estiguin limitades pel triangle pot ser la raó per la qual el desplaçament hagi estat més significatiu. Les dimensions de longitud també poden jugar un paper important alhora d'acomodar esforços, com més gran sigui la fractura més quantitat d'esforç pot acomodar mitjançant desplaçament.



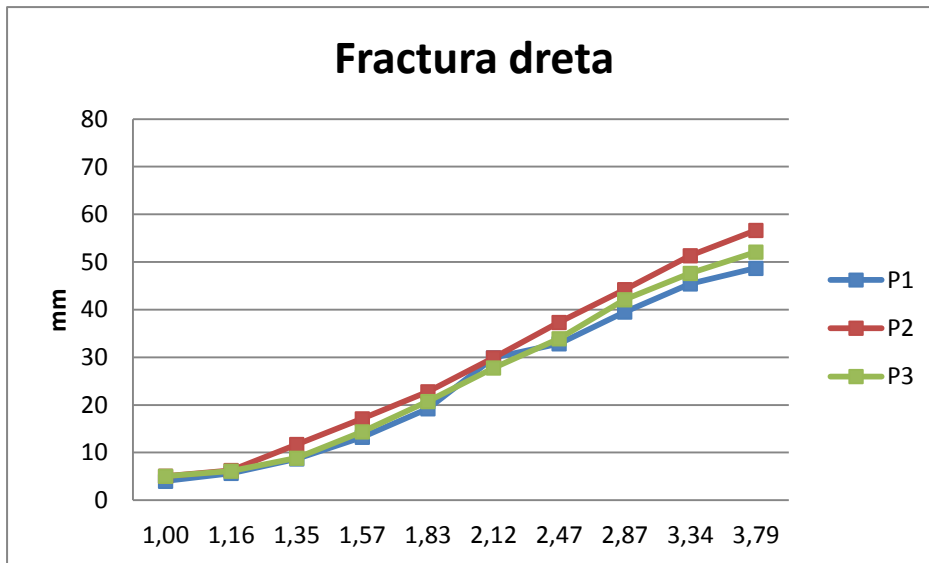


Fig. 10. Lliscament (*Slip*) de la fractura en mil·límetres segons els estadis deformatius estudiats (Rxz). S'han analitzat tres punts en cada fractura.

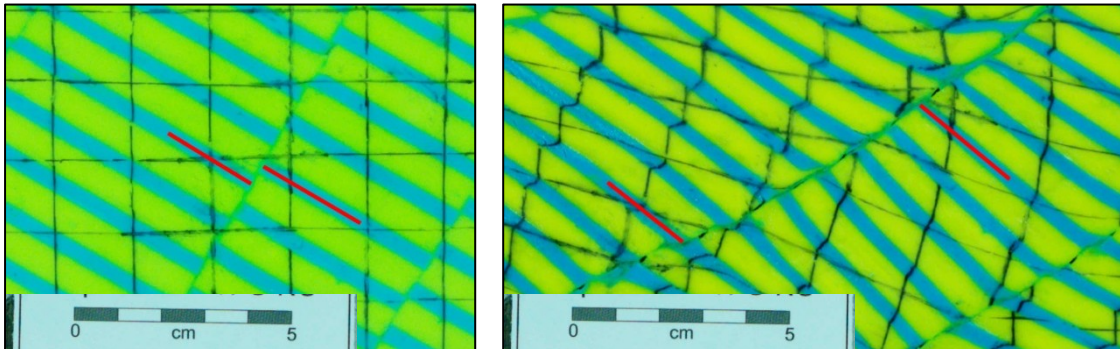
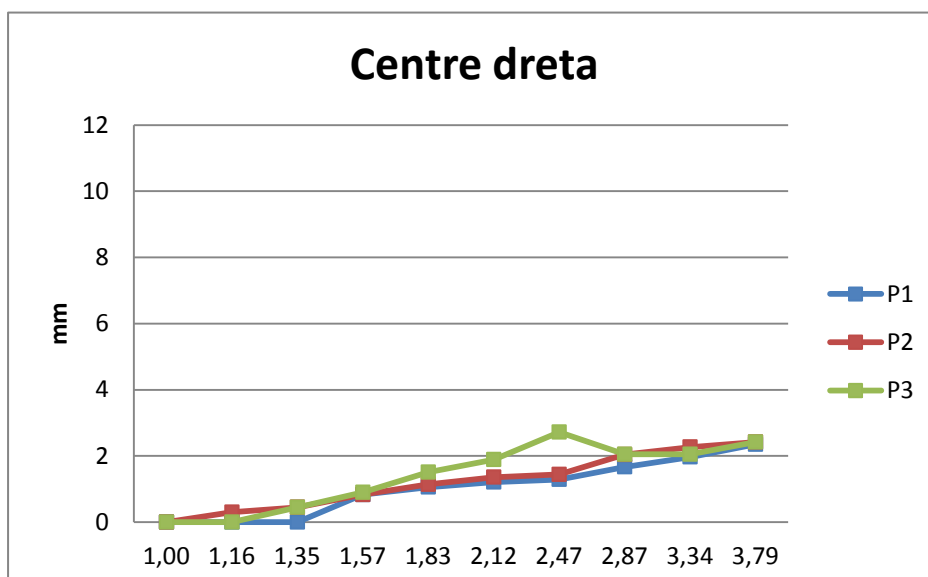
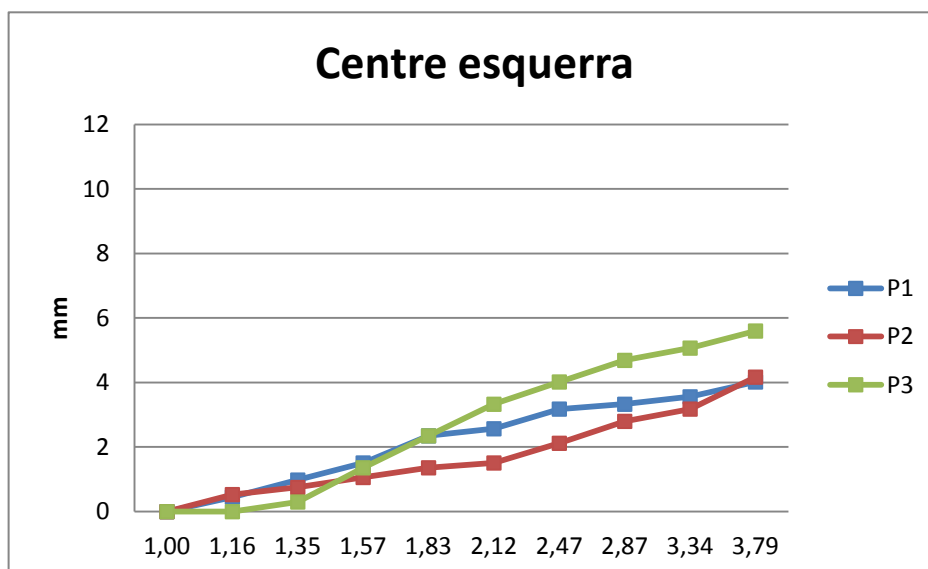
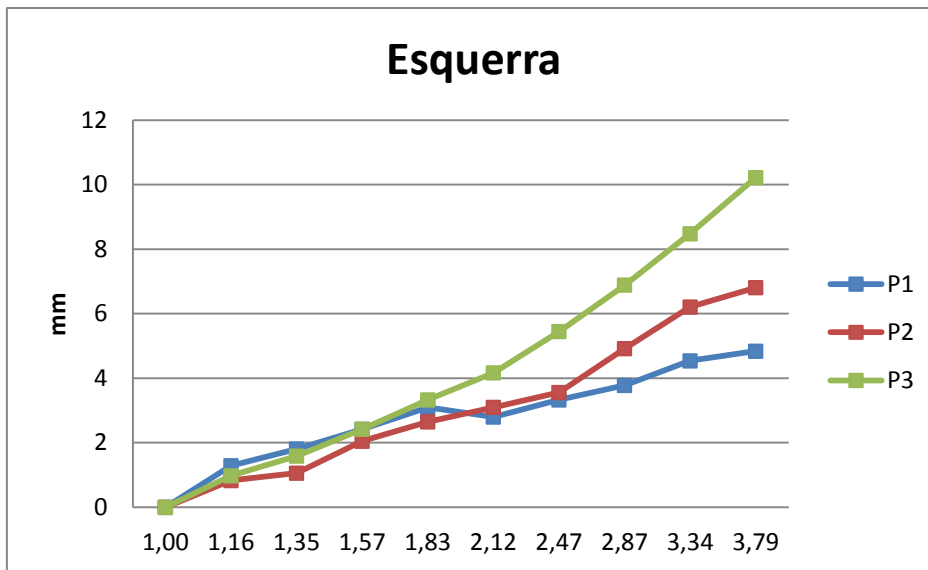


Fig. 11. Exemple de l'acomodació d'esforços mitjançant la reactivació de les fractures. Les línies vermelles marquen la separació que ha sofert una mateixa capa. En l'experiment de 30°. A l'esquerra, estadi inicial i a la dreta el final.

3.1.3. Cisalla de les capes

El comportament de les capes ha estat força homogeni amb una mitjana de desplaçament de l'ordre de mig centímetre, tot i que hi ha hagut alguns punts aïllats que han arribat al centímetre i alguns que no han sobrepassat els 2,5 mil·límetres.

S'ha dividit l'experiment en quatre zones per a fer l'estudi de cisalla de capes. Una part esquerra que ha manifestat desplaçaments de fins a 1 centímetre, la part dreta de fins a 0,7 centímetres i les dues parts centrals han acumulat desplaçaments d'entre 2,42 o 5,6 de màxima.



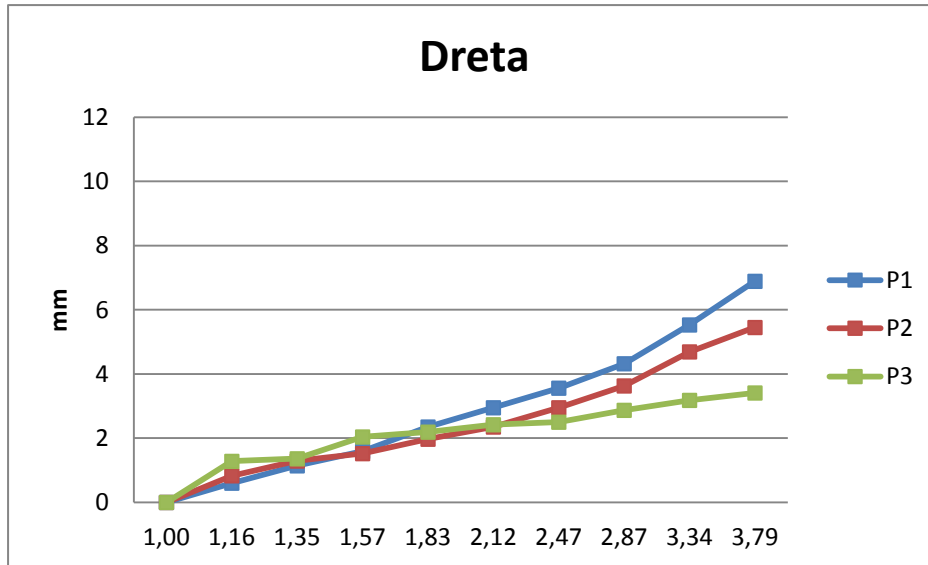


Fig. 12. Lliscament (*Slip*) de la capa en mil·límetres segons els estadis deformatius estudiats (R_{xz}). S'han analitzat tres punts en cadascuna de les 4 zones.

3.1.4. Gruix de les capes

Per a fer aquest estudi només s'ha tingut en compte el gruix de les capes blaves que són les menys competents i les que experimenten una variació més pronunciada. S'han estudiat tres dominis segons la direcció de màxim escurçament.

El primer domini (dalt) té un comportament bastant constant, disminueix el gruix progressivament a mesura que l'escurçament és més intens. El domini del centre és constant fins la meitat de l'experiment ($R_{xz} = 1,83$). En aquest punt el gruix es manté constant fins el següent estadi on torna a disminuir. A partir de $R_{xz} = 2,87$ el gruix s'incrementa fins finalitzar l'experiment. El tercer domini (baix) té un comportament homogeni però esglaonat. Als estadis $R_{xz} = 1,35$ i $2,12$ el gruix es manté constant tot l'estadi sencer, la resta d'estadis el gruix disminueix progressivament.

A part del l'escurçament (*shortening*) de les capes també hi ha un factor d'estirament (*softening*), en sentit oposat, de les mateixes pel simple fet de la conservació de l'àrea.

A partir d'aquestes dues dades s'ha generat un gràfic amb la relació entre estirament horitzontal i escurçament vertical de les capes com a possible factor d'acomodació dels esforços. Cal esmentar que la variació ha estat de pocs mil·límetres.

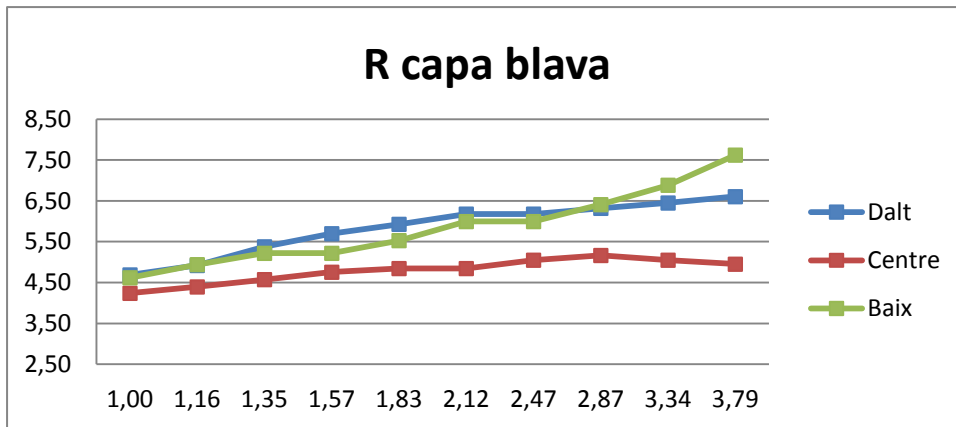


Fig. 13. Relació entre estirament horitzontal i escurçament vertical de les capes de color blau, menys competents, segons cada Rxz.

3.2. Experiment de 60°. Conceptes de deformació

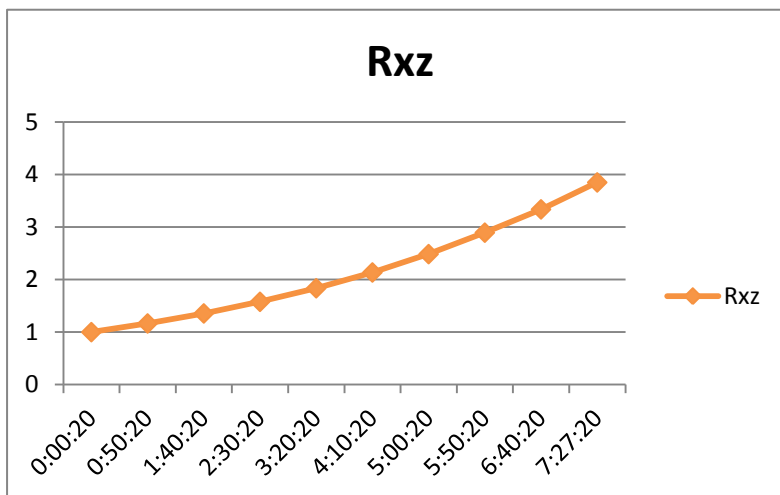


Fig. 14. Relació entre *stretch* en la direcció de l'eix X (estirament) i la direcció de l'eix Z (escurçament). En cada Rxz estudiat.

La relació de canvi de longitud entre els dos eixos d'esforços principals permet tenir una idea de l'evolució de la deformació al llarg de l'experiment. S'hi representa l'estirament relatiu en l'eix X respecte l'escurçament relatiu en l'eix Z. Aquest gràfic serveix de guia per entendre les dades dels resultats obtinguts en base a la deformació del bloc.

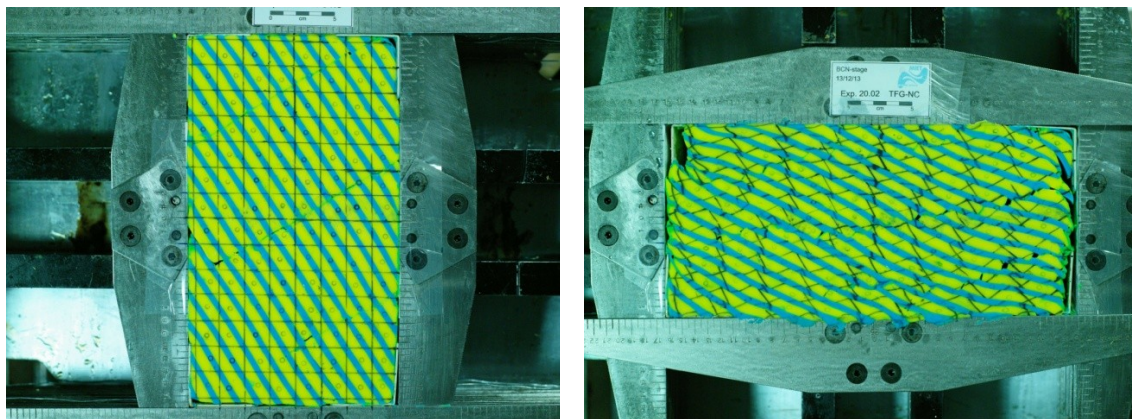


Fig. 15. Fotografia de l'inici (esquerra) i final (dreta) de la deformació de l'experiment de 60°.

3.2.1. Relació angular de capes i fractures respecte esforç principal (eix Z)

Aquest experiment té la peculiaritat que les fractures han quedat refractades per les capes blaves i l'estudi de les mateixes s'ha fet a partir de promitjos de totes les parts. No s'han desenvolupat les fractures preexistents.

En el segon experiment les capes han tingut el comportament esperat. Han seguit el mateix patró de rotació antihorària fins assolir angles d'entre 24 i 27°. La rotació ha estat homogènia i progressiva al llarg de tot l'experiment seguint el patró de deformació.

Les fractures no han pogut desenvolupar-se ni funcionar per si mateixes. S'han acomodat segons el comportament de les capes. Fins al tercer estadi deformatiu ($Rxz = 1,36$) l'angle no ha variat, a partir d'aquest punt la dinàmica general ha estat en augment, en comptes de disminuir que és el que s'esperava. La fractura esquerra, que travessa tot el bloc, ha tingut una evolució pràcticament lineal, mentre que les altres dues fractures fins $Rxz = 2,89$ han incrementat l'angle, i a partir d'aquest l'han començat a disminuir fins la finalització de l'experiment.

El contrast de competència entre les capes i la bona orientació de les mateixes respecte l'eix cinemàtic de màxim esforç han controlat l'evolució de les estructures deformacionals.

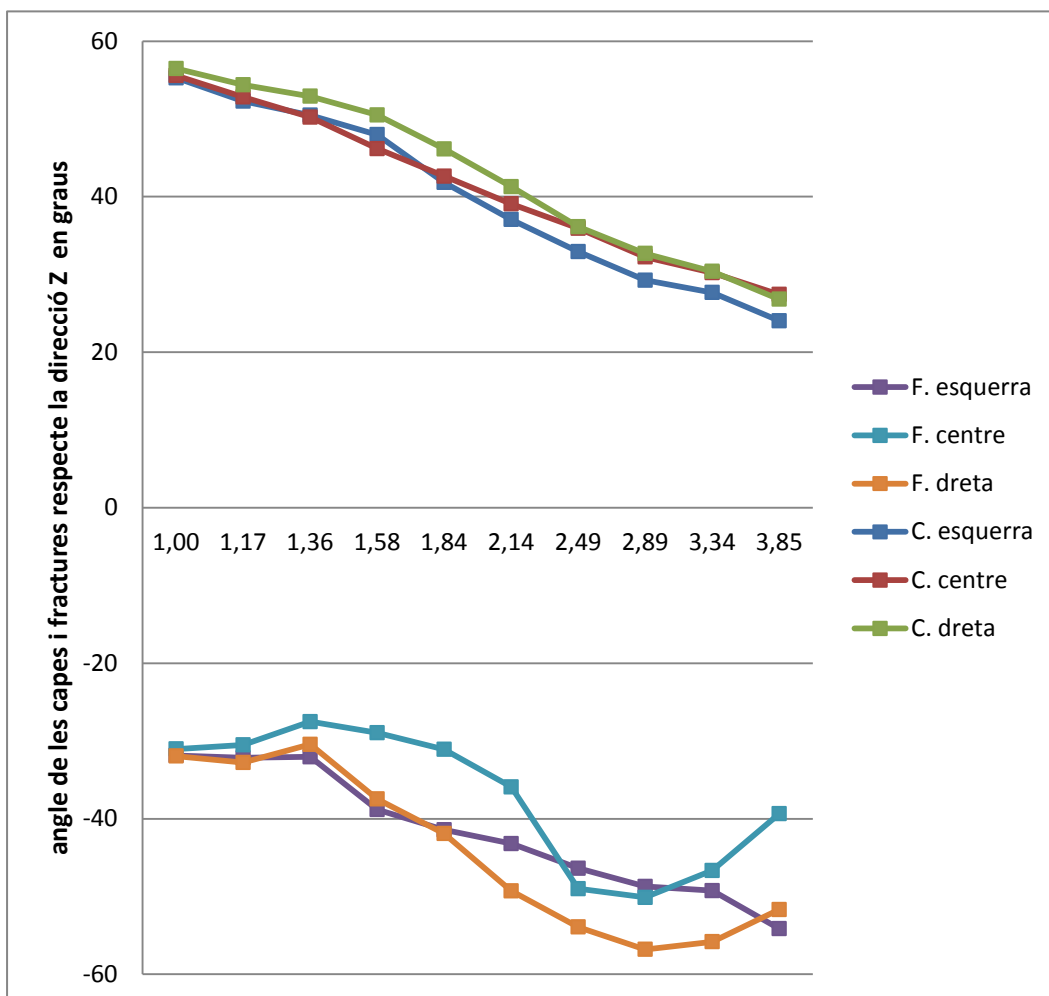


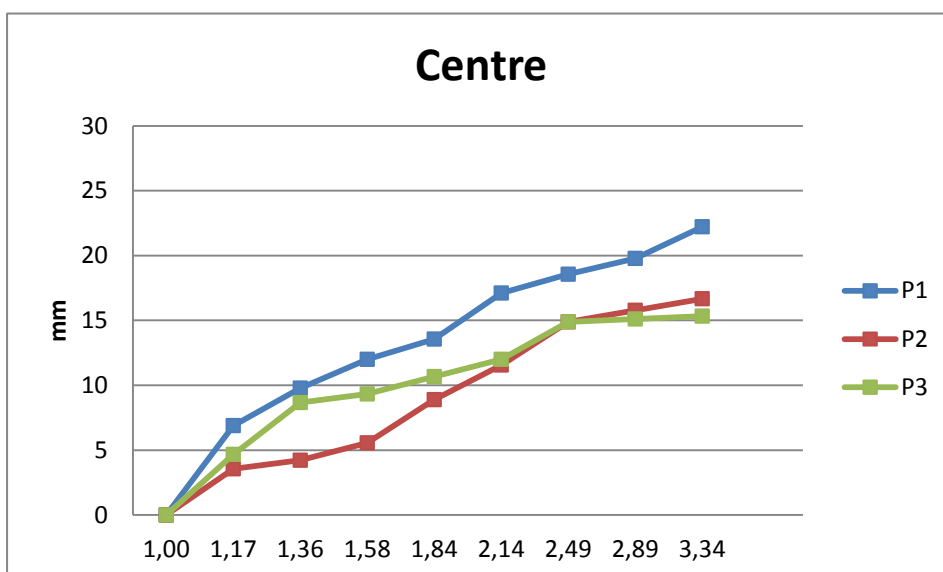
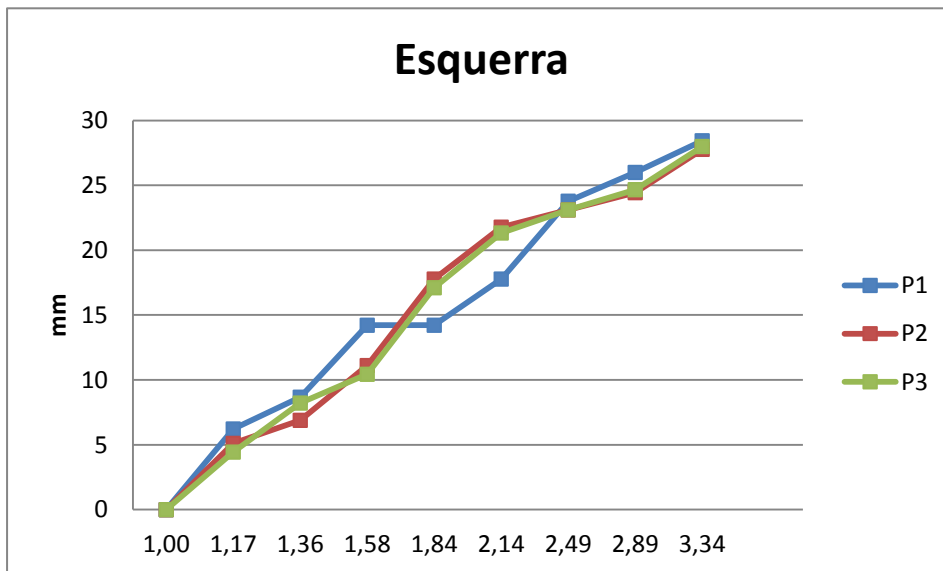
Fig. 16. Relació angular de les capes (C) i les fractures (F) respecte de la direcció de màxim escurçament i (eix Z) en cada Rxz. Els angles de les fractures es consideren negatius.

3.2.2. Cisalla de les capes

L'evolució passiva de les fractures, en aquest experiment, impossibilita la seva activació. El contrast de competència entre les capes blaves i grogues genera una refracció dels marcadors i, alhora de les fractures, per tant, no s'ha realitzat cap estudi de cisalla de fractures, només de capes.

Pel que fa a les capes, el seu comportament és molt similar i homogeni. En la zona central és on hi ha més dispersió dins de la mateixa capa però no és rellevant. La zona esquerra és la que assoleix un desplaçament més elevat amb gairebé 3 centímetres.

El lliscament entre capes és el factor important d'aquest experiment, la seva orientació respecte els esforços és favorable des dels estadis més inicials i a partir d'aquí tot l'esforç es localitza a la interfase de les capes.



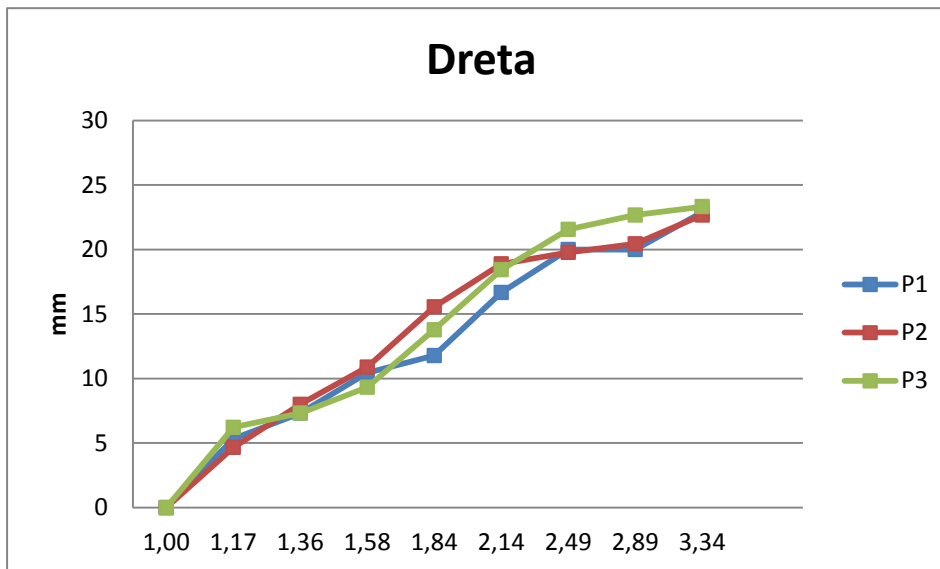


Fig. 17. Lliscament (*Slip*) de la capa en mil·límetres segons els estadis deformatius estudiats. S'han analitzat tres punts en cadascuna de les 3 zones.

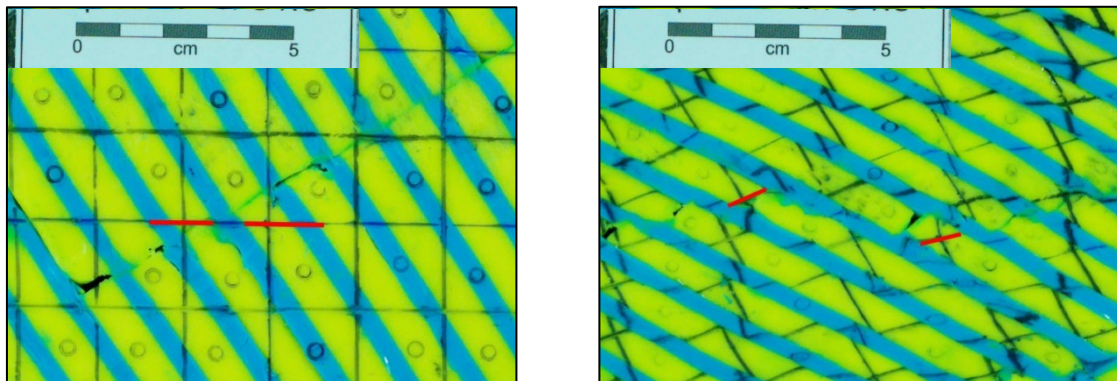


Fig. 18. Exemple de l'acomodació d'esforços mitjançant lliscament entre capes. Les línies vermelles marquen la separació d'un mateix marcador. En l'experiment de 60°. A l'esquerra, estadi inicial i a la dreta el final.

3.1.4. Gruix de les capes

Per a fer aquest estudi només s'ha tingut en compte el gruix de les capes blaves que són les menys competents i les que experimenten una variació més pronunciada. S'han estudiat tres dominis segons la direcció de màxim escurçament.

El primer domini (dalt) té un comportament bastant constant, disminueix el gruix progressivament a mesura que l'escurçament és més intens. Cap els estadis finals el gruix s'estabilitza i, en l'últim, augmenta. El domini del centre és contrari a tots els comportaments estudiats de gruix, augmenta des d'un principi i cap els estadis finals pateix una petita davallada. El tercer domini (baix) té un comportament homogeni decreixent, fins $R_{xz} = 1,84$ que s'estabilitza durant dos períodes i, seguidament, continua decreixent.

A part de l'escurçament (*shortening*) de les capes també hi ha un estirament (*softening*), en sentit oposat, de les mateixes pel simple fet de la conservació de l'àrea.

A partir d'aquestes dues dades s'ha generat un gràfic amb la relació entre estirament horitzontal i escurçament vertical de les capes com a possible factor d'acomodació dels esforços. Cal esmentar que la variació ha estat de pocs mil·límetres.

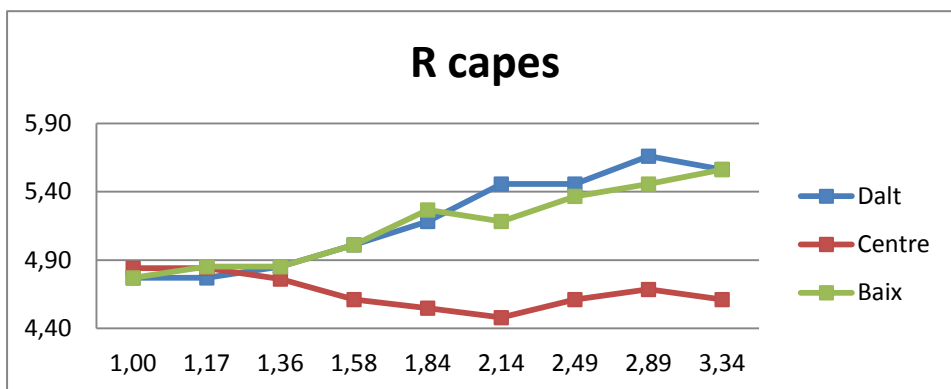


Fig. 19. Relació entre estirament horitzontal i escurçament vertical de les capes de color blau, menys competents. En cada Rxz estudiat.

4. Discussió

S'han realitzat un gran nombre d'estudis referents a zones de cisalla generades en materials anisòtrops com s'observa al Cap de Creus. El fet és que hi ha una diversitat de resultats que no permet establir un patró de comportament únic i homogeni.

Cosgrove (2007) va definir les zones de cisalla com els indicadors cinemàtics més utilitzats (estructures asimètriques que poden determinar la naturalesa del moviment i l'orientació del camp d'esforços operant en el temps de formació). Al camp, però, si no es coneixen els mecanismes de formació de les estructures és molt possible que les interpretacions cinemàtiques esdevinguin incorrectes.

Biot (1961, 1964, 1965) va descriure la deformació dúctil en materials mecànicament anisòtrops com les successions sedimentàries, i va demostrar que hi ha un augment de la localització de la deformació, i un canvi de deformació dúctil a fràgil. També va demostrar que aquests dos factors estan directament relacionats amb l'anisotropia mecànica i l'orientació d'aquesta respecte el camp d'esforços. (Fig. 4.). Un material és anisòtrop si la seva resistència a la compressió i a la cisalla són diferents. Com més diferents millor és l'anisotropia mecànica.

Aquest fet el corrobora Misra (et al., 2009), i argumenta que un sistema de baix grau d'anisotropia tendeix a desenvolupar dos conjunts de fractures per cisalla, en canvi, un sistema d'alt grau d'anisotropia, tendeix a desenvolupar-ne només un. Depenent de l'orientació de la foliació preexistent es desenvoluparà un o dos sistemes de cisalla (Carreras, 2001).

Els resultats obtinguts en els estudis dels experiments reflexen tots aquests arguments. Hi ha un augment de la localització de la deformació, en l'experiment de 30°, a les fractures, i un

inici de nucleació de noves cisalles seguint el patró de les fractures preestablertes i una propagació/reactivació de les mateixes. La forta anisotropia mecànica permet el desenvolupament de les cisalles (un únic sistema), especialment si la seva orientació respecte el màxim esforç (σ_1) és l'adequada. Ara bé, també s'ha demostrat que durant el procés deformatiu, l'anisotropia litològica i estructural actuen de manera conjunta. No hi ha un factor determinant que esdevingui dominant, ni en els dos experiments ni al llarg de tot l'experiment. Es desenvolupa eficaçment el factor que presenta millor orientació per acomodar els esforços. Si les fractures estan ben orientades s'activaran i generaran desplaçament d'ambdós blocs, i si les capes s'orienten correctament passarà a dominar el lliscament. És un equilibri entre orientació de les estructures i el camp d'esforços.

Hi ha un factor important alhora de reconèixer i interpretar les estructures, l'escala. L'anàlisi de les fotografies de l'experiment de 30° mostra una zona molt propera a una fractura que no ha estat afectada per la deformació, sinó que ha actuat com un cos rígid i ha rotat sense patir deformació important. Les propietats del material no són diferents ni s'han modificat les condicions per assolir aquests resultats. Els esforços s'han acomodat mitjançant l'activació de la fractura i la rotació de les capes. Això fa evident que alhora de fer interpretacions al camp és molt important tenir una visió a petita escala, però alhora també del conjunt, ja que podem observar una zona aparentment intacta que ha estat involucrada en un procés deformatiu important a gran escala.

En l'experiment de 60° ha dominat el lliscament paral·lel a les capes (*layer-parallel slip*) i les fractures preexistents no es reactiven i es deformen passivament a través de la foliació o multicapa. El factor dominant ha estat el lliscament (*slip*) entre capes que ha acomodat tots els esforços mitjançant el lliscament i estirament de les capes menys competents. Cap els estadis finals de la deformació s'observa com les fractures preexistents (esquerdes de tensió) es separen i generen cavitats que arriben a tenir unes dimensions considerables. En aquestes cavitats s'hi comença a introduir el material menys competent i més plàstic, i és per on hi circularien els possibles fluids.

5. Conclusions

- Aquests experiments demostren la gran influència de les propietats reològiques i mecàniques dels materials a deformar en les estructures resultants.
- El treball s'ha centrat en l'efecte de fractures prèvies perpendiculars al bandejat o foliació en materials multicapa.
- Els resultats de la deformació són dràsticament diferents segons l'orientació del bandejat i fractures perpendiculars respecte els eixos cinemàtics i esforços:
 - **Angle de 30° respecte Z o σ_1 :** hi ha una localització de la deformació al llarg de les fractures preexistents, amb reactivació d'aquestes com a zones de cisalla dúctil. Destaca la compartimentació en 3 dominis, separats per les fractures, de la deformació. Especialment, el domini central progressa com a cos rígid amb rotació senestra. El lliscament entre capes és poc important. Cal destacar que els resultats són coherents amb algunes observacions del Cap de Creus, on les zones de cisalla nucleen i es propaguen al llarg de diàclasis preexistents.

- **Angle de 60° respecte Z o σ_1 :** hi ha una localització de la deformació mitjançant lliscament entre capes i evolució passiva de les fractures preexistents. El fet que hi hagi contrast de competència, tot i que lleuger, entre capes determina un patró complex de refracció de tots els marcadors passius, incloses les fractures prèvies. No hi ha compartimentació en dominis de la deformació, l'angle inicial de les capes (60°) va disminuint progressiva i homogèniament. En aquest cas s'observa un aprimament de les capes més important que en la situació de 30°.

Cal destacar que l'acomodament per lliscament entre capes no sempre és senzill de determinar en situacions d'aflorament, ja que moltes vegades no hi ha marcadors o indicadors per contrastar-ho.

- En general s'observa que la mateixa cinemàtica pot generar estructures totalment diferents. Això passa perquè la deformació es particiona de forma diversa en funció de les relacions angulars i estructurals, preexistents. Cal tenir molta cura a l'hora d'interpretar la deformació regional a partir d'estructures observades al camp. El factor escala pot ser determinant.
- Els sistemes de fractures són inversament proporcionals al grau d'anisotropia mecànica del material.

6. Bibliografia

- BLOT, M. A. 1961. Theory of folding of stratified viscoelastic media and its implication in tectonics and orogenesis. *Geological Society of America Bulletin*, 72, 1595-1620.
- BIOT, M. A. 1964. Theory of internal buckling of a confined multilayer sequence. *Geological Society of America Bulletin*, 75, 563-568.
- BIOT, M. A. 1965. *Mechanics of Incremental Deformation*. Wiley, New York.
- Carreras, J., 2001. Zooming on Northern Cap de Creus shear zones. *Journal of Structural Geology* 23, 1457-1486.
- Carreras, J., Cosgrove, J.W., Druguet, E., 2013. Strain partitioning in banded and/or anisotropic rocks: Implications for inferring tectonic regimes. *Journal of Structural Geology* 50, 7-21.
- Cosgrove, J.W., 2007. The use of shear zones and related structures as kinematic indicators: a review. *Geological Society, London, Special Publications* 272, 59-74.
- Gomez-Rivas, E., Grier, A., 2009. Influence of mechanical anisotropy on shear fracture development. *Trabajos de Geología, Universidad de Oviedo*, 29: 305-311.
- Gómez-Rivas E., Grier A. 2012 Shear fractures in anisotropic ductile materials: An experimental approach. *Journal of Structural Geology* 34: 61-76
- Misra, S., Mandal, N., Chakraborty, C., 2009. Formation of Riedel shear fractures in granular materials: findings from analogue shear experiments and theoretical analyses. *Tectonophysics* 471, 253-259.